干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

陕西省五级流域降水致洪特征分析

雷田旺[1]， 张 翀[2]， 王 娜[3]， 周 旗[2]， 雷杨娜[3]

（1. 西安交通工程学院，陕西 西安 710065；
2. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，陕西 宝鸡 721013；
3. 陕西省气候中心，陕西 西安 710014）

摘 要：全球变暖引发的极端气候事件及其对人类社会的影响一直备受瞩目。以纬向地带性较明显的陕西省为研究对象，利用水文、气象、人口（POP）、国民生产总值（GDP）空间分布数据以及基础地理信息数据，采用统计分析法、三参数幂函数法、K-S检验及空间分析等方法，结合《陕西省暴雨洪涝灾害风险分析系统》探究了该地区五级流域的降水致洪的空间分异及承载体暴露特征，并研究分析不同降水情景下各五级流域致洪重现期分布情况。结果表明：（1）陕西省在大雨情景时，洪水的分布特征呈现出南少北多的状态；在暴雨情景下洪水的分布呈现出中部与西南部较轻。（2）重现期临界面雨量的等值区域分布趋近于等高线分布，且等值线极值呈现上升趋势。（3）不同重现期承载体暴露度在中低风险区呈下降趋势，在高风险和极高风险区呈上升趋势，10 a一遇重现期暴露量呈现先快后慢的上升特征，100 a一遇重现期呈现先慢后快的上升趋势。本文基于陕西省五级流域，依据地理空间分析并结合灾害系统的结构体系，为分析降水致洪的空间分异规律提供了新的探索，对陕西省防灾减灾及流域治理工作提供决策支撑。

关 键 词：五级流域；空间分异；临界面雨量；洪水
文章编号：

全球气候变暖引发的极端降水、洪涝、高温热浪等极端天气事件屡见不鲜，给人类生命财产安全造成了严重威胁[1-4]。IPCC第五次评估报告（AR5）根据新的观测事实，更为完善的归因分析和气候模式模拟结果，进一步确认了气候变暖的事实[5]。就长期气候变化而言，伴随着全球平均地表气温的上升，全球降水将会伴随着一定的时滞效应而增加，纬向平均降水量的变化也会呈现显著的空间差异[5]，气候变暖必然会改变全球和区域的水循环过程，引起降水的时空分布、强度和频率等发生改变，增加水资源系统的复杂性和不确定性[6-7]。气候变化导致暴雨、洪涝等极端降水事件的发生及其增加的自然灾害风险正成为人类生存所面临的重大挑战[7]。陕西省位于中纬度地区，暴雨是陕西省洪水发生的主要致灾因子[8]，受夏季风的影响，降水的时空分布很不均匀，并且具有历时短、强度大、局地性强的特征，因而极易造成局地严重的暴雨洪水[9]。洪涝灾害的形成与降水和下垫面要素关系密切，目前计算致洪临界面雨量方法通常有统计分析法及水文分析法[10-12]，段生荣[13]、林志东等[14]基于统计分析法建立降水与洪水的关系计算暴雨洪涝的临界面雨量，樊建勇等[15]通过建立流量、洪水及降水的关系反推出山洪临界面雨量；现有方法大多基于水文动力分析及统计方法，对某类地形地貌或行政区进行相应的模拟研究，在致洪模拟中均呈现出较好的结果，但并未综合多类地形地貌、社会经济及相关土地利用方式进行洪涝灾害分析，且均未依据流域等级进行降水致洪的模拟研究。本文针对陕西省降雨时

收稿日期：2020-11-18； **修订日期**：2021-08-05
基金项目：国家自然科学基金面上项目（41771215）；商洛市气候适应型城市重点实验室开放研究基金项目（SLSYS2019015）；陕西省科技厅项目（2021JQ-954）资助
作者简介：雷田旺（1992-），男，助教，硕士，主要从事自然灾害评估与资源评价研究. E-mail: ltw0229@163.com
通讯作者：王娜（1984-），女，高级工程师，硕士，主要从事气象灾害风险评估及气候变化. E-mail: wangna_na@163.com

空分布不均、地形地貌复杂、生态环境脆弱、受气候变化影响显著、社会经济活动愈加繁忙等特点[16]，基于陕西省五级流域的水文、气象、历史淹没数据、流域基础数据和国民生产总值(GDP)空间分布数据、人口(POP)、土地利用现状等承载体数据，采用统计分析法获得降水与径流序列，并结合《陕西省暴雨洪涝灾害风险分析系统》进行淹没分析；通过ArcGIS空间分析功能进行分析陕西省五级流域的空间差异及降水致洪的时空特征，并探讨研究区内承载体的暴露情况，为人类社会、经济及农业活动布局和防灾减灾工作提供科学依据。

1 研究区概况

陕西省(31°42′~39°35′N，105°29′~111°15′E)跨越黄河、长江两大水系，包含53个五级流域，其空间分布如图1所示。陕西省地貌特征以高原、山地为主，平原、盆地面积较小，总面积205603 km²，流域面积占全省总面积的97.7%；人口为3876.21×10⁴人，GDP总量25793.17×10⁸元，耕地面积303×10⁴ hm²。陕西省呈现南北狭长的辖域特征，北部为陕北黄土高原区，占全省总面积的45.0%，海拔1000~1500 m；中部为关中平原，占全省总面积的19.0%，海拔间于300~800 m；南部为秦巴山地，占全省总面积的36.0%，海拔1000~3000 m。陕西省位于我国东南湿润区与西北干旱区的过渡地带。冬季盛行偏北风，干燥寒冷；夏季盛行偏南风，气温较高，降水较多。气候总特点是：春季干燥降水少，气温回升快而不稳定，风沙天气较多；夏季雨热同期，间有伏旱；秋季凉爽湿润，气温下降快；冬季寒冷干燥，气温低，雨雪稀少[17]。

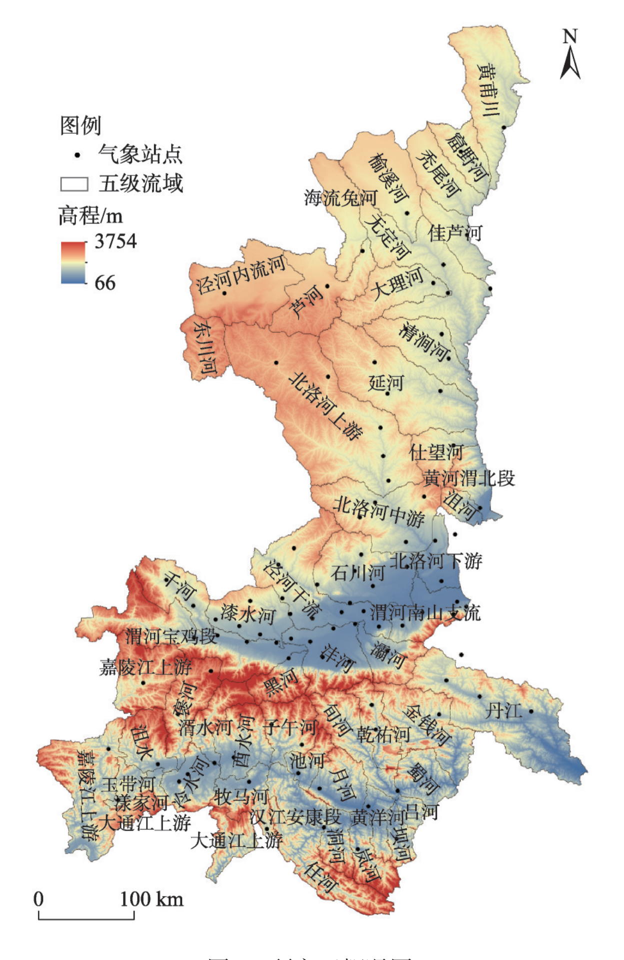


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文使用数据包括：水文数据、降水数据、洪灾数据、流域边界数据、人口(POP)、GDP、数字高程模型(Digital elevation model，DEM)、土地利用现状(Land use and cover change，LUCC)等基础地理信息数据。

水文数据由项目实施获取，包括陕西省五级流域主要控制水文站水位与流量降水序列、不同等级水位与典型洪水场次水位、流量与洪量数据。降水数据，包括全省各气象站点、水文站(1964—1986年和2001—2013年)的逐日与逐时气温与降水等要素历史序列、洪水过程降雨数据，由陕西省气象局提供。洪灾数据来源于陕西省统计年鉴、中国气象灾害大典(陕西卷)。流域边界数据由项目实施获取。DEM栅格(30 m×30 m)数据下载自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。2015年GDP与POP栅格(1 km×1 km)数据下载自地理国情检测云平台(http://www.dsac.cn/)。2018年土地利用现状栅格(100 m×100 m)由中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)提供，分析数据的栅格空间分辨率为30 m×30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 不同重现期最大降水量拟合 为解决单一风险区划无法满足不同洪涝灾害严重程度等级变化的问题，引入重现期概念进行暴雨洪涝灾害风险评价，设置不同重现期情景作为致灾因子，对比分析不同重现期下暴雨洪涝灾害风险区划异同。根据IPCC-SREX报告中所提出的风险表达，以多年观测

日降水数据为基础，提取年最大值组成年最大降水序列（Annual maximum，AM），运用分布函数拟合AM序列，得到不同重现期最大日降水强度，并定义T年一遇重现期对应F=1−1/F（F为T年一遇对应重现期的降水量）的AM序列降水极值，通过设置不同的重现期参数得到站点5 a、10 a、15 a、20 a、30 a、50 a和100 a共7种重现期的最大日降水量拟合结果。然后采用科尔莫洛夫−斯米尔诺夫（K-S）检验法对拟合结果进行优度检验，并根据K-S假设检验值，对所有分布函数进行优度排序，依据K-S假设检验排名，确定逐个站点排名第一的最优分布函数及该函数计算的重现期结果。

2.2.2 致洪临界面雨量计算 不同重现期致洪临界面雨量的确定是依据三参数幂函数法建立水位、流量和降水量之间的关系，以及将9 h累计面雨量与流量进行一元线性回归分析降水量与流量之间的关系，以流量为纽带构建水位−流量−降水的关系，从而建立水位和降水量的关系，最终通过防洪标准水位确定致洪临界面雨量，进一步通过最优概率分布的选取和基于K-S检验的洪水发生期间流量最大值最优概率，从而确定不同重现期致洪面雨量阈值。流域面雨量计算公式如下：

$$p = \frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n} p_i \times a_i \tag{1}$$

式中：p为流域面雨量（mm）；p_i为第i个气象站的降水量（mm）；a_i为第i个泰森多边形的面积（m^2）；A为流域总面积（m^2）；n为流域内所有气象站点的个数。

2.2.3 不同重现期洪水淹没分析 基于水动力方法计算不同重现期洪水淹没深度及范围，同时考虑了1个栅格周围的8个单元，对邻近栅格单元的泻入量由Manning Stricker公式计算，计算公式如下：

$$V = K_{st} \times r_{hy}^{2/3} \times I^{1/2} \tag{2}$$

式中：V为速度（m·s^{-1}）；K_{st}为地表（明渠）粗糙情况对水流影响的系数（m）；r_{hy}为水力半径（m）；I为地形（明渠）坡度（L·L^{-1}）。

坡度由单元之间的最低水位和最高地形高程之间的差异所决定，对每一个单元都进行计算。相邻单元的流量长度被认为是相等的；位于对角线的单元，以不同的长度算法来计算。

水流的淹没深度即淹没水位高程和地面高程的高差值，计算公式如下：

$$\begin{aligned}\text{flow_depth} = \text{water_level}_a - \\ \max(\text{elevation}_a, \text{elevation}_b)\end{aligned} \tag{3}$$

式中：flow_depth为淹没深度（m）；water_level$_a$为a点的水位高程（m）；elevation$_a$为a点的地形高程（m）；elevation$_b$为b点的地形高程（m）。

淹没过程中的水流方向由地形坡向所决定，对于地面任何一点地形坡向反映了坡向表征该点高程值改变量的最大变化方向，地形坡向是淹没过程中对水流方向最大的影响因素，水流方向计算公式如下：

$$\text{aspect} = 270 - \frac{360}{\pi} \times \alpha \tan^2\left[\frac{\partial z}{\partial y}, \frac{\partial z}{\partial x}\right] \tag{4}$$

式中：aspect为流向（°）；α为地形坡度（°）；$\frac{\partial z}{\partial y}$为南北方向高程变化（m）；$\frac{\partial z}{\partial x}$为东西方向高程变化（m）。

3 结果与分析

3.1 不同情景的洪水空间分异

降雨是造成洪水爆发不可忽视的因素，陕西省发生暴雨与大暴雨日分布呈现从陕北向陕南显著增加趋势，依据国家气象标准《降水量等级》（GB/T28592−2012）[18]可将24 h内的降水量划分如表1中的7个等级，而造成陕西省洪水发生的降水主要是大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨[19]。

表1 降雨等级划分

Tab. 1 Rainfall classification

降雨等级	24 h降水量/mm
微量降雨（零星小雨）	<0.1
小雨	0.1~9.9
中雨	10.0~24.9
大雨	25.0~49.9
暴雨	50.0~99.9
大暴雨	100.0~249.9
特大暴雨	≥250.0

由于发生特大暴雨时，全省各地均面临严重的洪涝灾害[20]，因此本文通过ArcGIS处理陕西省五级流域基础数据、国家雨量站数据以及重现期的临界面雨量数据集，模拟陕西省五级流域在设定大雨、暴雨、大暴雨情景下的洪水分布情况，并结合研究区内各五级流域地形坡度、主要土壤占比及归一化植被指数（Normalized difference vegetation index，NDVI）进一步分析下垫面。土壤质地分类方法依据

土壤中砂粒和黏土粒组合比例[21]的不同分为棕壤、褐土、黑土、栗钙土、漠土、岩性土、潮土、沼泽土、盐碱土、水稻土10类。具体不同情景下致洪重现期空间分异如图2~4所示。

大雨情景下(图2),研究区划分为4个分区,其中安全区有43个流域,洪水分布总体呈现出北多南少的态势,发生5 a一遇洪水的流域1个,位于黄土高原南缘;发生10 a一遇洪水的流域有6个,均匀分布于陕西全境,各流域内植被覆盖度相差较大,地形坡度介于7.47°~21.20°之间,土壤类型分布也较多;发生20 a一遇洪水的流域有2个,均分布于陕西北部,流域内植被覆盖度相近,土壤类型单一的流域内平均地形坡度为13.66°,高于多类土壤流域内的平均地形坡度2.74°;总体呈现植被覆盖度越高则地形坡度也随之增加,在植被覆盖度相近的条件下,流域内土壤类型越多地形坡度越高,但黄土高原区内土壤类型相近的2个流域岩性土的占比越高则坡度越高,秦巴山区则棕壤占比越高则坡度越高。

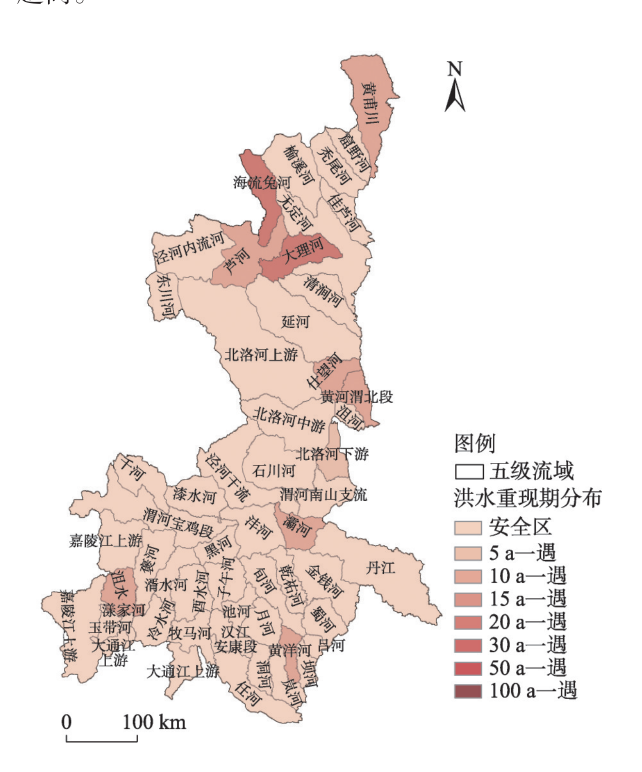


图2 大雨情景洪水空间分异

Fig. 2 Spatial differentiation of flood in heavy rain scenarios

暴雨情景下(图3),安全区主要分布于关中平原西部渭河流域上游的泾河干流、漆水河和渭河干流宝鸡段流域,汉江上游支流褒河流域以及陕西南部嘉陵江上游流域;发生5~30 a重现期洪水的34个五级流域均匀分布于陕西全境,其中发生15 a一遇洪水的6个流域较为集中的分布在关中平原和陕西南部;发生50 a一遇洪水有8个流域,其中7个流域集中分布在陕北黄土高原区,而关中平原仅有灞河流域;总体呈现出南轻北重的特征。分析洪水发生区下垫面可知,在岩性土占比超75%的洪水发生区,植被指数间于0.15~0.39,重现期较大的流域内坡度较小(3.23°~16.17°);在棕壤占比超70%的洪水发生区,植被指数间于0.39~0.82,地形坡度间于17.71°~26.72°,均处于较高值,重现期变化与地形及植被指数无明显趋势,但未发生50 a一遇洪水;指明相同降水情景下相比棕壤而言,岩性土较高时流域内重现期较大。

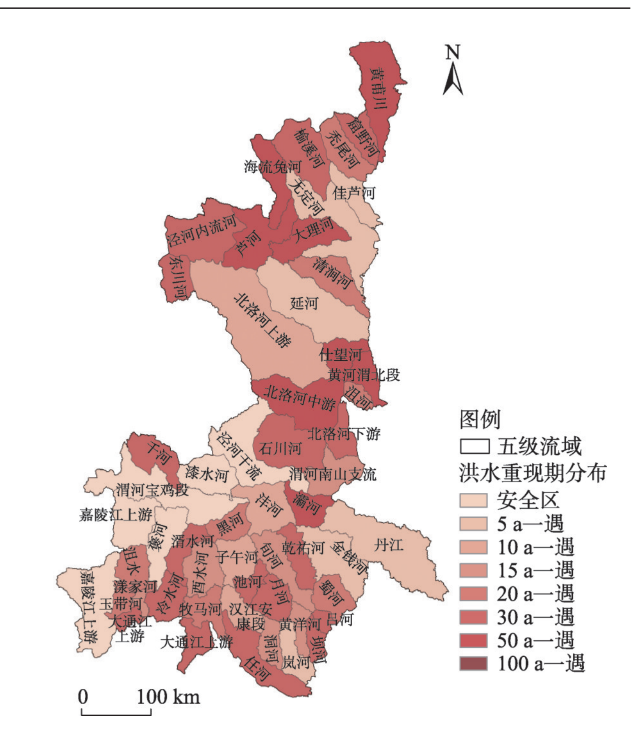


图3 暴雨情景洪水空间分异

Fig. 3 Spatial differentiation of flood in rainstorm scenarios

大暴雨情景下(图4),研究区内均发生不同重现期的洪水,包括30 a、50 a和100 a一遇的洪水发生区。发生30 a、50 a一遇的洪水发生范围较为集中,主要分布在关中西部和陕南西部流域,共27个流域。100 a一遇的洪水分布广泛且分散,共26个流域。洪水的分布呈现出中西部及西南部较轻,其余区域较重的特征。分析重现期洪水发生区下垫面,陕西中部和西南部地形坡度相对较小,土壤类型比较混杂,植被覆盖情况较好,导致降水较难汇

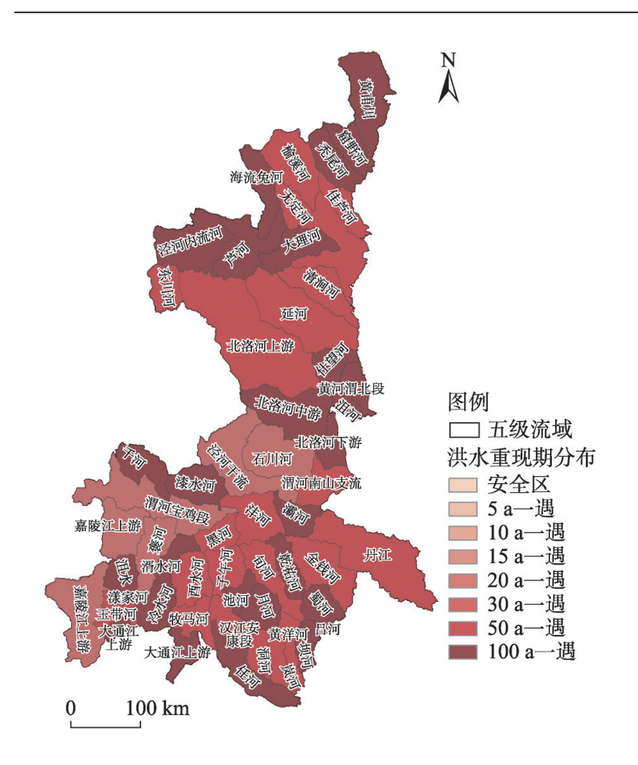


图4　大暴雨情景洪水空间分异

Fig. 4　Spatial differentiation of flood in heavy rain scenarios

流，加之植被广布能截流，因此重现期较小。

综合观察图2~4可知，随着设定降水量的增大，洪水淹没范围及发生洪水重现期随之增加，尤其是北洛河中游、仕望河、渭河干流渭北段，灞河、沮水、皇甫川、芦河、海流图河和大理河流域则更为明显。究其原因，陕南秦巴山区，处于温湿暴雨中心，一般情况下暴雨笼罩面积较大、历时长、强度大、洪水陡涨陡落，随着降雨时间的持续及强度加大。陕西北部黄土沟壑区，处于干旱区、半干旱区，暴雨笼罩面积小、强度大、历时短，加之植被差，超渗产流，洪水暴涨暴落，例如1994年8月30日北洛河暴雨洪水和2017年7月26日绥德暴雨洪水。降雨容易诱发洪水的原因主要在于地势的高差较大创造了良好的汇流条件，而皇甫川、芦河、海流图河和大理河则因为位于半干旱区，降水量较少，因此与其他地区相比在同一等级的降雨量条件下容易诱发较高重现期的洪水。

3.2　模拟不同重现期洪水的临界面雨量分布情况

通过对不同重现期的临界面雨量模拟，并对面雨量栅格进行等间隔自定义区划，依据区划等值线规律表明等值线越密，说明该地区的数值分布差异大越大，反之越小[22]。利用空间分析工具制作陕西省五级流域不同重现期临界面雨量的空间分布，如图5所示。

发生5~15 a重现期洪水总体呈现出陕西北部黄土高原区重现期内的降雨量分布较为单一，关中平原及南部秦巴山区在不同重现期内则呈现出较大差异；发生20~50 a重现期洪水时，陕西北部总体呈现出由西北向东南的递增趋势，中部地区呈现出由外向内的递增态势，南部秦巴山区则表现出以商洛东部为核心向外递增的趋势；不同重现期情景下临界面雨量的大小及分布形式不同的极值闭合区较多发生，但在100 a一遇情景下临界面雨量空间差异较大，10 a、30 a、50 a、100 a一遇洪水最大临界面雨量等值区域数值分别为60 mm、80 mm、100 mm、150 mm，主要位于关中西部及东部地区，最小临界面雨量的等值区域数值分别为30 mm、40 mm、50 mm、70 mm，主要位于陕西北部及南部汉江流域，不同区域表现出较大致洪临界面雨量空间差异。

临界面雨量最大值位于关中西部，包括千河、渭河干流宝鸡段和漆水河西部流域和泾河部分零散流域，分析原因千河、渭河干流宝鸡段、漆水河和泾河流域地势平坦，起伏不大，使得降水汇流较难，加之土地利用类型以耕地为主，耕地与其他土地利用类型相比，具有较为松软的土质，导致降水下渗能力比较强[23]，因此这些流域与其他流域相比只有在降水量较大的时候才会爆发洪水；最小数值位于芦河、仕望河和北洛河中部流域。

芦河流域高差较大，北部毛乌素沙漠降水较少，因此与其他流域相比在降雨较少的情况下就会达到重现期较大的洪水，模拟全省五级流域发生同一重现期的洪水时芦河的降水量也就较少。仕望河和北洛河中游流域具有较为良好的汇流条件，仕望河流域地势周围高中间低，北洛河中游流域地势北高南低，东西高中部低，在暴雨发生时容易迅速汇聚雨水诱发洪水，因此与其他流域相比在降雨较少的情况下就会达到重现期较大的洪水。

3.3　不同重现期降水致洪的承灾体暴露度情况

随着风险理念在灾害管理中的不断深化和应用，风险分析中承载体暴露度评估是国际风险管理理事会(IRGC)风险管理框架中至关重要的环节，采用《陕西省暴雨洪涝灾害风险分析系统》模拟不同重现期洪水淹没情况，在遵循洪水风险等级划分原则的基础上，叠加流域内的POP、GDP以及土地利用等承灾体分布特征，评估分析淹没范围内各类承灾

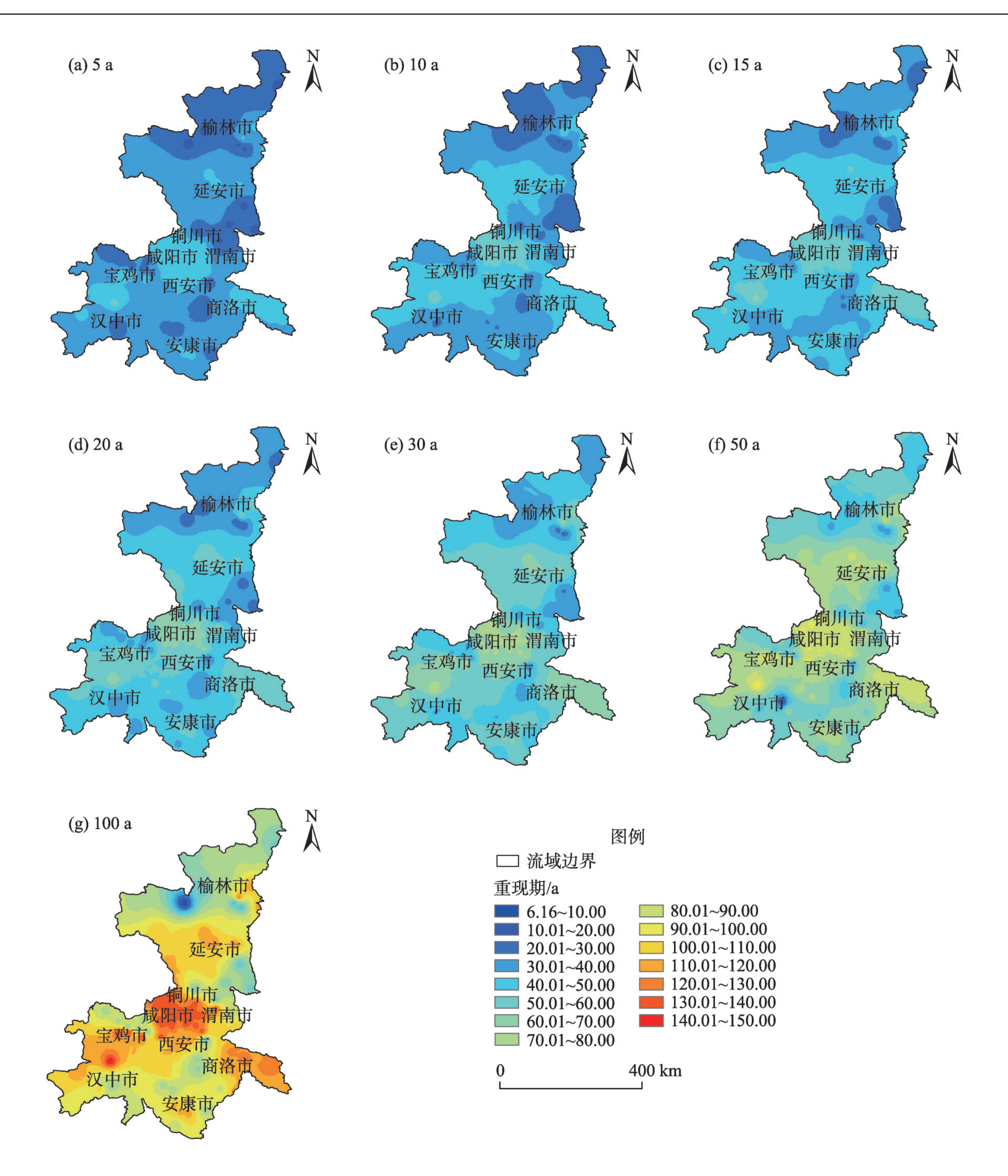


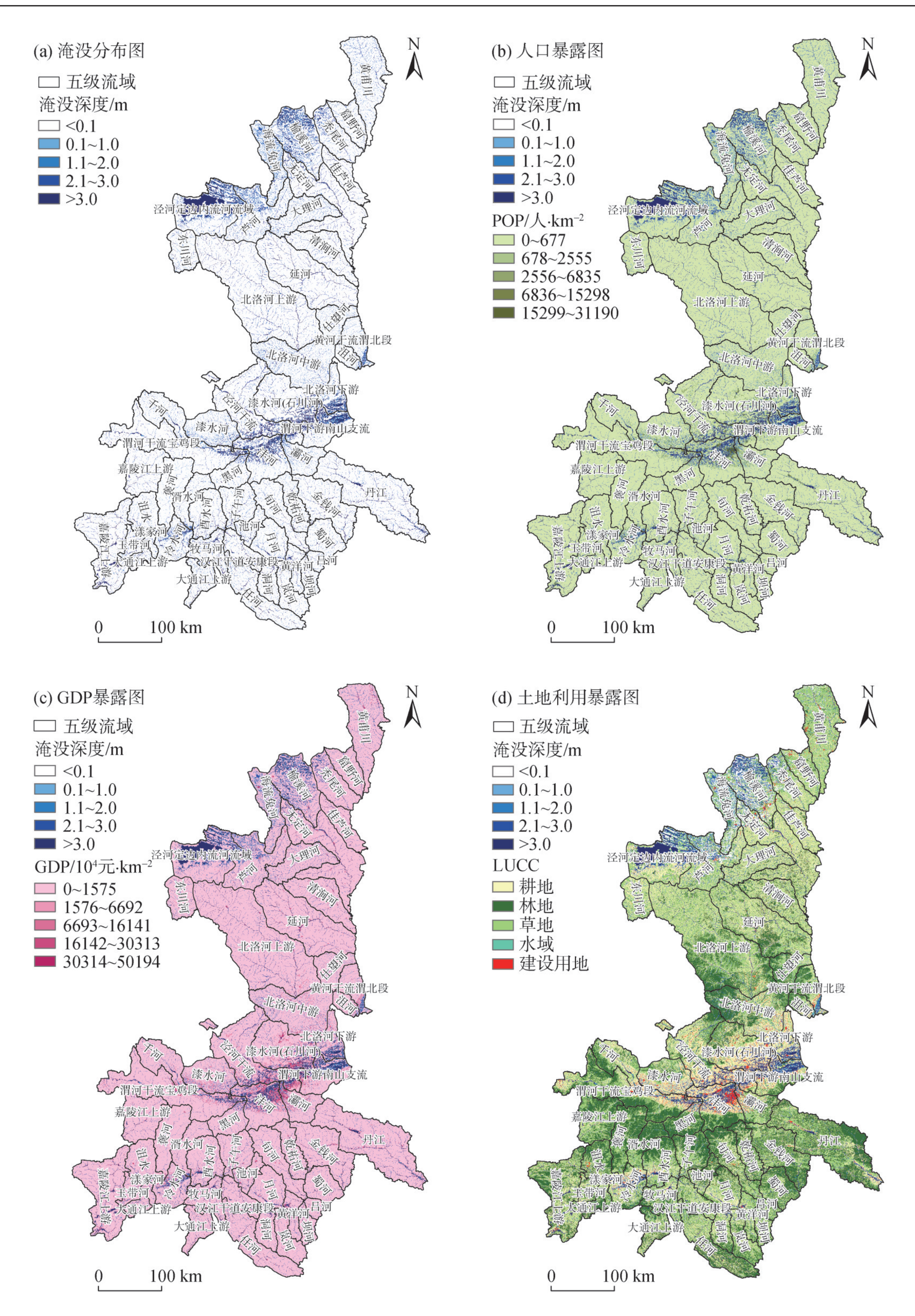
图5　不同重现期的致洪临界面雨量分布

Fig. 5　Distributions of flood-causing critical areal rainfalls at different return periods

体可能损失和洪灾发生风险的空间分布，根据逐个类别的数值与方差的大小实行分类效果优劣断定风险等级，将洪水淹没深度分为5个级别：< 0.1 m、0.1~1.0 m、1.0~2.0 m、2.0~3.0 m、> 3.0 m，利用这5个淹没深度将洪灾风险通用划分为5个等级，分别是：安全区、低风险、中等风险、高风险和极高风险[23]。以100 a一遇重现期降水致洪为例，其淹没情况如图6所示。

研究承灾体暴露程度需要全面考虑淹没水深和淹没面积，采用ArcMap空间分析工具对承灾体暴露情况进行分区统计，100 a一遇承载体暴露程度如表2所示。

由表2可知，模拟陕西省五级流域100 a一遇的洪水发生时，在不同淹没水深下，承灾体POP、GDP、耕地和建设用地暴露量存在差异。因此，分别对淹没水深小于2 m的安全区、低风险区、中等风险区与



注：POP为人口；GDP为国民生产总值；LUCC为土地利用现状。

图6 100 a一遇暴雨致洪暴露图

Fig. 6 Map of flood exposure due to heavy rain in 100 a

大于2.0 m的极高风险区和高风险区在不同重现期下GDP、POP、耕地、建设用地的暴露程度进行统计，统计结果如图7所示。

综合可知，当模拟陕西省五级流域不同重现期的洪水发生时，承灾体的暴露情况随着5 a至100 a一遇洪水的设定，POP的暴露占比在安全区、低风险和中等风险下呈现下降趋势，在高风险和极高风险下呈现上升趋势；GDP的暴露占比在低风险、中等

表2 100 a一遇降水致洪承灾体暴露情况统计

Tab. 2 Statistics of exposure of flood bearing body caused by precipitation in 100 a

淹没水深/m	人口(POP)		国民生产总值(GDP)		耕地		建设用地	
	POP/10^4人	占比/%	GDP/10^8元	占比/%	面积/hm²	占比/%	面积/hm²	占比/%
<0.1	3214.79	85.37	7312.74	77.27	6327749.70	87.84	366344.10	80.78
0.1~1.0	102.46	2.72	297.01	3.14	109012.77	1.51	13266.81	2.93
1.1~2.0	1.74	0.05	470.51	4.97	255438.18	3.55	20737.08	4.57
2.1~3.0	179.98	4.78	499.31	5.28	221057.82	3.07	20604.69	4.54
>3.0	266.62	7.08	884.21	9.34	290410.29	4.03	32533.83	7.17

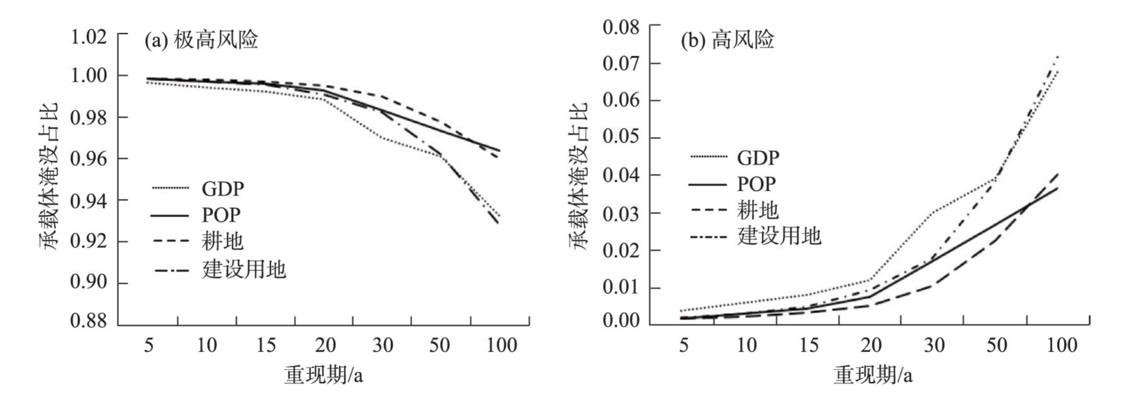


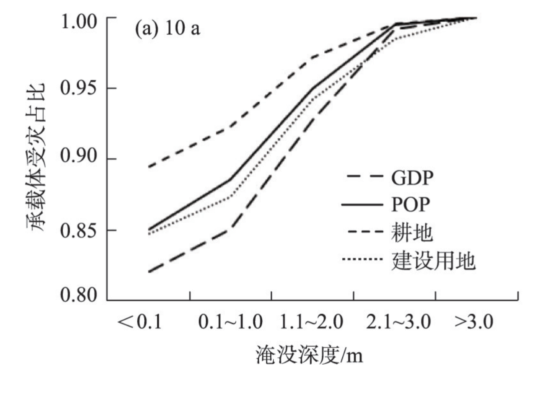
图7 不同重现期极高风险区与高风险区暴露度统计

Fig. 7 Exposure statistics of extremely high risk area and high risk area in different return periods

风险和高风险下呈现下降趋势，在极高风险下呈现上升趋势；耕地面积与建设用地暴露占比在低风险和中等风险下呈下降趋势，在高风险和极高风险下呈上升趋势。

基于承灾体的GDP、土地利用类型、耕地和建设用地统计信息，来获取设定不同重现期洪水发生时的承灾体暴露占比。并绘制10 a、100 a一遇的不同洪水淹没深度等级下的POP、GDP、耕地和建设用地的暴露占比图，如图8所示。

由图8可知，模拟10 a一遇的洪水发生时，随着淹没深度的增加，POP、GDP、耕地和建设用地的暴露占比也明显增大，在0~3 m的深度范围内具有先快后慢的上升特征。其中，GDP的增速最快，耕地的增速最为缓慢。模拟100 a一遇的洪水发生时，随着淹没深度的增加，POP、GDP、耕地和建设用地的暴露占比也明显增大。在0~3 m的深度范围内具有先慢后快的上升特征。其中，GDP的增速最快，耕地的增速最为缓慢。随着10~100 a一遇洪水的设



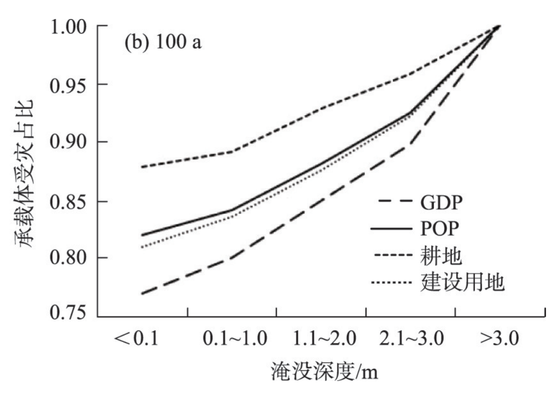


图8 10 a、100 a一遇洪水不同淹没深度下的POP、GDP、耕地、建设用地受灾占比

Fig. 8 Proportions of population, GDP, cultivated land and construction land affected by floods at different inundation depths in 10 a and 100 a

定，陕西省五级流域暴露的POP、GDP、耕地、建设用地面积暴露占比均在中等风险和低风险区呈下降趋势，在高风险和极高风险区呈上升趋势。模拟10 a一遇的洪水发生时，随着淹没深度的增加，POP、GDP、耕地和建设用地的暴露占比呈现先快后慢的上升特征，而100 a一遇的洪水呈现先慢后快的上升特征。

4 讨 论

暴雨致洪是陕西省自然灾害主要致灾因子，已经在不同程度上对社会经济发展带来很大的制约与威胁，因此，探讨降水致洪特征及其影响成为防灾减灾工作的迫切需求。以往研究主要从某一流域、行政边界、降水历时及降水等级进行分析洪水的空间分异[24-25]，且大多基于重现期内的降水致洪进行具体研究。本文基于流域划分边界，对陕西省53个五级流域的5 a、10 a、15 a、20 a、30 a、50 a、100 a共7个重现期的降水致洪特征进行空间分异分析，并设定陕西省大雨、暴雨和大暴雨等主要致洪降水情景下，各五级流域发生不同重现期的洪水分布情况；依据现有灾情统计信息，基于陕西省五级流域分析降水致洪空间分布特征及承载体暴露情况进行梳理。研究发现陕西省各五级流域不同降水情景下诱发的不同重现期洪涝发生的分布特征，为陕西省防灾减灾的统战工作提供一定的科学依据和决策支撑。暴雨洪涝灾害作为陕西省最主要的自然灾害之一，无论承载体暴露情况如何都应重视洪涝灾害的科学防治，加强暴雨洪涝监测预警与应急管理。

5 结 论

（1）陕西省在大雨情景时，洪水的分布特征呈现出南少北多的状态；在暴雨情景下洪水的分布呈现出中部与西南部较轻，其余地区较重的特征。

（2）从致洪临界面雨量分布形态来看，随着重现期5~100 a一遇洪水的设定，临界面雨量的等值区域分布趋近于等高线分布，呈现由较为均匀到极不均匀的转变，并且等值区域的数值表明，临界面雨量的极值呈现增大的趋势。

（3）承灾体暴露度情况：随着5~100 a一遇洪水的设定，POP、GDP、耕地、建设用地面积暴露占比均在中等风险和低风险下呈下降趋势，在高风险和极高风险区呈上升趋势，清涧河流域的变化特征亦是如此。模拟10 a一遇的洪水发生时，随着淹没深度的增加，POP、GDP、耕地和建设用地的暴露量呈现先快后慢的上升特征，而100 a一遇的洪水呈现先慢后快的上升特征。

参考文献（References）

[1] 何佳, 薛亚永, 周旗, 等. 近63年陕西宝鸡极端强降水事件变化特征诊断[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 53–58. [He Jia, Xue Yayong, Zhou Qi, et al. Diagnosis of variation characteristics of extreme precipitation event in Baoji for 63 years[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(5): 53–58.]

[2] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. 地理科学, 2014, 34(11): 1281–1290. [Shi Peijun, Kong Feng, Fang Jiayi. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(11): 1281–1290.]

[3] 程先富, 郝丹丹. 基于OWA-GIS的巢湖流域洪涝灾害风险评价[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1312–1317. [Cheng Xianfu, Hao Dandan. Flood risk assessment in Chaohu Basin based on OWA-GIS[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1312–1317.]

[4] 方建, 杜鹃, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1085–1093. [Fang Jian, Du Juan, Xu Wei, et al. Advances in the study of climate change impacts on flood disaster[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(9): 1085–1093.]

[5] 董思言, 高学杰. 长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56–59. [Dong Siyan, Gao Xuejie. Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report[J]. Climate Change Reserch, 2014, 10(1): 56–59.]

[6] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1–9. [Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1–9.]

[7] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370–1379. [Zhang Liping, Du Hong, Xia Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1370–1379.]

[8] 蔡新玲, 雷向杰, 王娜, 等. 陕西省气象灾害灾情特征及年景评估[J]. 陕西气象, 2011(4): 17–20. [Cai Xinling, Lei Xiangjie, Wang Na, et al. Meteorological disaster characteristics and year assessment in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2011(4): 17–20.]

[9] 桑京京, 查小春. 近60年陕西省洪涝灾害对经济社会发展影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 140–145. [Sang Jingjing, Zha Xiaochun. Effect of flood disasters on economic and social development in nearly 60 years in Shaanxi Province[J]. Journal of Ar-

id Land Resources and Environment, 2011, 25(7): 140-145.]

[10] 顾西辉, 张强, 孙鹏, 等. 新疆塔河流域洪水量级、频率及峰现时间变化特征、成因及影响[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1390-1401. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Sun Peng, et al. Magnitude, frequency and timing of floods in the Tarim River, Xinjiang: Characteristics, causes and impacts[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1390-1401.]

[11] 裴亮, 陈晨. 基于SWAT模型的细河流域土地利用/覆被变化对径流影响的研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(11): 157-161, 164. [Pei Liang, Chen Chen. SWAT model of runoff study under different land use and land cover situation in Xihe Basin[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(11): 157-161, 164.]

[12] 熊俊楠, 龚颖, 程维明, 等. 西藏自治区近30年山洪灾害时空分布特征[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 557-570. [Xiong Junnan, Gong Ying, Cheng Weiming, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years[J]. Mountain Research, 2018, 36(4): 557-570.]

[13] 段生荣. 典型小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. 水利规划与设计, 2009(2): 20-21, 57. [Duan Shengrong. Analysis of computation results of critical rainfall causing flood disasters in representative small basins[J]. Water Resources Planning and Design, 2009(2): 20-21, 57.]

[14] 林志东, 陈兴伟, 林木生, 等. 东南沿海西溪流域暴雨洪水的时空变化特征[J]. 山地学报, 2017, 35(4): 488-495. [Lin Zhidong, Chen Xingwei, Lin Musheng, et al. Spatial and temporal variations of storm-floods in Xixi Watershed of southeast coastal region[J]. Mountain Research, 2017, 35(4): 488-495.]

[15] 樊建勇, 单九生, 管珉, 等. 江西省小流域山洪灾害临界雨量计算分析[J]. 气象, 2012, 38(9): 1110-1114. [Fan Jianyong, Shan Jiusheng, Guan Min, et al. Research on analysis and calculation method of critical precipitation of mountain torrents in Jiangxi Province[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(9): 1110-1114.]

[16] 雷波, 焦峰, 王志杰, 等. 黄土丘陵区不同植被带典型小流域生态脆弱性评价[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 149-159. [Lei Bo, Jiao Feng, Wang Zhijie, et al. Eco-environment vulnerability assessment of typical small watersheds in different vegetation zones of loess hilly area[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 149-159.]

[17] 宋海龙, 万红莲, 朱婵婵. 过去1400年陕西地区霜冻灾害事件及其影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 170-176. [Song Hailong, Wan Honglian, Zhu Chanchan. Research on frost disaster events and effects in Shaanxi region for the past 1400 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 170-176.]

[18] 国家气象中心. GB/T28592-2012:8. 降水量等级[S]. 北京：中国标准出版社出版, 2012. [National Climate Center. GB/T28592-2012:8. National standard of the precipitation grade[S]. Beijing: Standard Press of China, 2012.]

[19] 陶林威, 马洪, 葛芬莉. 陕西省降水特性分析[J]. 陕西气象, 2000(5): 6-9. [Tao Linwei, Ma Hong, Ge Fenli. Analysis of precipitation characteristics in Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2000(5): 6-9.]

[20] 李茜, 蔡新玲, 徐军昶, 等. 陕西省暴雨灾害风险实时评估技术研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(25): 241-246. [Li Qian, Cai Xinling, Xu Junchang, et al. Study on real-time risk assessment technology of heavy rain disaster in Shaanxi Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 241-246.]

[21] 朱显谟, 贾文锦, 张相麟, 等. 暂拟陕西土壤分类系统[J]. 土壤通报, 1959, 37(1): 23-27. [Zhu Xianmo, Jia Wenjin, Zhang Xianglin, et al. Tentative Shaanxi soil classification system[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1959, 37(1): 23-27.]

[22] 赵梅. 甘南州主要河流地表径流演变趋势研究[J]. 地下水, 2018, 40(4): 208-212. [Zhao Mei. Study on surface runoff evolution trend of main rivers in Gannan Prefecture[J]. Ground Water, 2018, 40(4): 208-212.]

[23] 姜智怀, 巩志宇, 李嫦, 等. 基于降水时空分布情景模拟的暴雨洪涝致灾危险性评价[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(5): 464-470. [Jiang Zhihuai, Gong Zhiyu, Li Chang, et al. Storm flooding disaster risk assessment based on scenarios simulation of spatial and temporal distributions of precipitation[J]. Torrential Rain and Disasters, 2016, 35(5): 464-470.]

[24] 孔锋, 方建, 吕丽莉, 等. 中国短历时和长历时暴雨对总暴雨贡献的空间差异性研究(1961—2015)[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 293-303. [Kong Feng, Fang Jian, Lü Lili, et al. Spatial pattern difference between contribution of short and long duration heavy rainfall to total heavy rainfall in China from 1961 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 293-303.]

[25] 程肖侠, 梁奇琛, 蔡新玲. 陕西省单站暴雨特征及评估方法[J]. 干旱区地理, 2014, 37(1): 66-73. [Cheng Xiaoxia, Liang Qichen, Cai Xinling. Characteristic analyses and procedure evaluation of rainstorm in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 66-73.]

Flooding characteristics of precipitation in five-level basins of Shaanxi Province

LEI Tianwang[1], ZHANG Chong[2], WANG Na[3], ZHOU Qi[2], LEI Yangna[3]

(1. Xi'an Traffic Engineering Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Disaster Monitoring and Mechanism Simulation Key Laboratory in Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, Shaanxi, China; 3. Climate Center of Shaanxi Province, Xi'an 710014, Shaanxi, China)

Abstract: Extreme climate events caused by global warming and their impact on human lives have been comprehensively explored. One of these events is flooding, which has a very complex occurrence mechanism. Rainfall and underlying surface factors, including vegetation, landform, and soil, are closely related with the occurrence of flood. Among them, rainfall is the consequential external force factor that causes floods. In the fifth-grade river basins in Shaanxi Province in the hinterland of mainland China, numerous short-duration, strong-intensity local rainstorms are observed in summer. Therefore, the main flooding type in this province is induced by rainstorms. In this study, Shaanxi Province, which has obvious zonality, was considered as the research object. The spatial differentiation of rainfall-induced flooding and carrier exposure characteristics of the five-level basins in the region was explored through hydrology, meteorology, POP, GDP, basic geographic information data analysis, statistical analysis, three-parameter power function method, K-S test, spatial analysis, and other methods combined with “Shaanxi Province Rainstorm and Flood Disaster Risk Analysis System”. The distribution of flood-induced return periods was analyzed in each five-level basin under different precipitation scenarios. ArcGIS spatial analysis method was used to examine the spatial differentiation patterns of flooding caused by a decrease in water levels under different scenarios in the fifth-grade watersheds of Shaanxi Province. Based on this, the spatial and temporal characteristics of flooding induced by precipitation in this region were evaluated, and the exposure of the disaster-bearing body in the study area was discussed. The prediction and early warning and disaster prediction assessment of precipitation-induced flooding were conducted in the study area to create a layout of human social, economic, and agricultural activities and provide scientific basis for disaster prevention and mitigation. The results show that (1) the distribution of floods in Shaanxi Province under heavy rain scenarios is low in the south and high in the north. The distribution of floods in central and southwestern regions is lower. (2) The regional distribution of the critical surface rainfall during the return period is close to contour distribution, and the extreme value of the contour increases. (3) Upward and downward trends of carrier exposures in different return periods are observed in low- and medium-risk areas and high-risk and extremely high-risk areas, respectively. The once-in-a-ten-year return period exposure first increases rapidly and subsequently increases gradually. The upward trend ten during the once-in-a-hundred-year return period occurs slowly at first and rapidly thereafter.

Key words: five-level basin; spatial difference; critical surface rainfall; flooding